

イオンビーム・プラズマ系の波動現象 I

— イオンビームの発生 —

中 島 邦^{*}・出 原 敏 孝^{*}・石 田 美 雄^{*}

Wave Phenomena in an Ion Beam-Plasma System I —Generation of Ion Beam—

Kuni NAKAJIMA, Toshitaka IDEHARA, Yoshio ISHIDA

(Received Apr. 15, 1976)

An ion beam source is constructed, in which the ions are extracted from plasma produced in the TP-D device and accelerated by a grid electrode. As the energy and density of it can be varied independently, the source is suitable for the investigation of wave phenomena in an ion beam-plasma system.

1. 序 論

プラズマ中に生ずる波動現象の研究は、プラズマの構成粒子と波動との相互作用の観点から興味がある。特にプラズマが平衡状態から非平衡状態へ移行した場合に起きる波動の不安定性の研究、および波動の不安定性を介してプラズマが平衡状態へ復帰する過程で起きる種々の現象の研究は、プラズマ物理における最も興味ある課題のひとつである。非平衡状態にあるプラズマの典型的な例は高速荷電粒子を含んだプラズマすなわち、ビーム・プラズマ系であり、これまでもこの系を用いて上記の研究がなされてきた¹⁾。特に実験室で発生しやすい電子ビーム・プラズマ系における波動の研究は数多くなされ、不安定波動の線型なふるまいの段階にとどまらず、非線型なふるまいの段階にいたる広範な現象に関して興味ある結果が得られている。

一方、イオンビーム・プラズマ系における波動の研究に関しては、イオンビームのパラメーターを独立に

制御できるイオン源の開発²⁾が遅れたこともあって体系的な研究は数少ない³⁾。今回われわれは、プラズマ中に励起されたイオン波とプラズマ中に注入されたイオンビームとの相互作用によるイオン波の不安定性を研究するために必要なイオンビーム源を作製した。イオンビーム源としては、ビームのエネルギーおよび密度が独立に制御できることが望ましい。われわれの作製したイオンビーム源は、ほぼこの条件を満足するものである。

2. 実験装置および方法

実験装置は、図1に示したように全長約220cm、内径9.5cmの円筒状パイレックスガラス管からなる真空容器が主体をなしている。容器は図の右の部分の放電領域（測定領域）と、図の左の部分のイオンビーム発生領域とからなっており、2つの4インチ油拡散ポンプにより、 5×10^{-6} Torrの真空にまで引かれる。放電領域（測定領域）では、アルゴンガスを注入し、 $10^{-4} \sim 10^{-3}$ Torrの真空度でアノードとカソード間の

* 応用物理学科

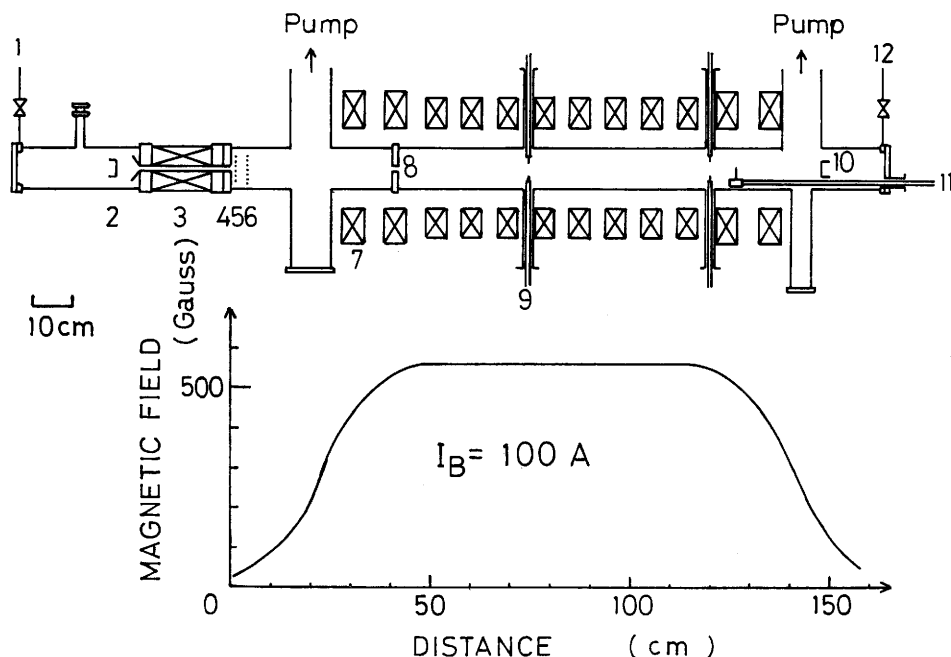


図1 装置図概観および磁場分布。(イオンビーム発生領域) 1 ガス注入口 2 カソード
3 集束コイル 4 アノード 5 第1メッシュ 6 第2メッシュ(測定領域)
7 磁場コイル 8 アノード 9 r プローブ 10 カソード 11 z プローブ 12 ガス注入口

直流放電によってアルゴンプラズマを作り、静磁場を印加することによって、これを容器の管軸の近くに保持している。静磁場を印加するために12個の空心コイルが図1のように配置され、コイル電流 100A のとき測定領域全体にわたってガラス管の管軸上で約 550 Gauss の均一な磁場を得ている。また、この部分には管の半径方向に可動な r プローブ 4 本と、管軸方向に可動な z プローブ 1 本が挿入されており、イオン波の送信、受信、プラズマパラメーターの測定に用いられる。この部分で生成されたプラズマの電子温度は約 $5 \times 10^4 \text{ K}$ で電子密度は 1 cm^3 あたり 10^9 個程度である。図1の左の部分が今回報告するイオンビーム発生領域(イオンビーム源)である。この部分は左からカソード、オリフィス、集束コイル、アノード、第1メッシュ、第2メッシュ(加速メッシュ)の順で成り立っている。左端のニードルバルブからアルゴンガスを注入し、 $10^{-3} \sim 10^{-2} \text{ Torr}$ 程度の真真空度でカソードとアノードおよびアノードと同電位にした第1メッシュ間の直流放電によってアルゴンプラズマを作り、集束コイルで静磁場を印加することによってこれを保持している。このようにして作られたプラズマから、第1メ

ッシュ(アノード)に対して第2メッシュに負の電圧を加えることによって、アルゴンイオンを引き出し加速する。このアノードに対する第2メッシュの電圧を加速電圧 V_a と呼ぶ。このようにして発生したイオンビームは、イオンビーム発生領域と測定領域を結ぶ十字管を通り測定領域の磁場によって集束されながらアノード(測定領域側)の穴を通して測定領域に注入される。このイオンビーム発生領域と測定領域とを結ぶ十字管は、4インチ油拡散ポンプによって $10^{-5} \sim 10^{-6} \text{ Torr}$ 程度の真真空度に保たれている。今回報告するこのイオンビーム源によって発生するイオンビームのパラメーターの測定は、この十字管の部分にファラデーカップ⁴⁾(図2)を挿入することによって行った。用いたファラデーカップは、イオンビームの測定に充分適したものである。イオンビームの測定は、ファラデーカップのケースを第2メッシュと同電位にし、それに対してファラデーカップのコントロールグリッドの電圧(Retarding Potential) V_0 を正の方に変化させて、ファラデーカップのコレクターに流れるイオン電流(Collector current) I_c を測定した。X-YレコーダーのX軸に V_0 、Y軸に I_c をとることによ

て、いろいろなパラメーターに対する V_g と I_c の関係を書かせた。その一例が図3(a)である。この図では加速電圧 V_a をパラメーターにしてあるが、たとえば、 $V_a=200V$ の場合を見ると、 V_g が200Vより充分高いとファラデーカップのコレクターにイオン電流

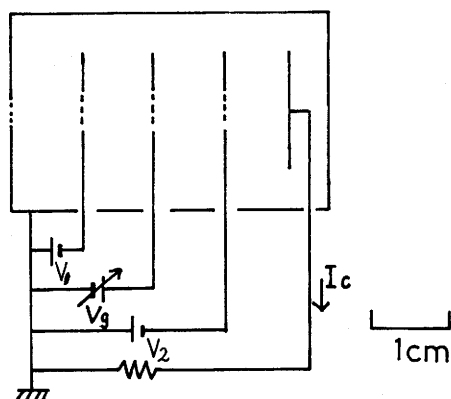


図2 ファラデーカップ概略図。 $V_1 = -20V$, $V_g = 0 \sim 200V$, $V_2 = -20V$ 。

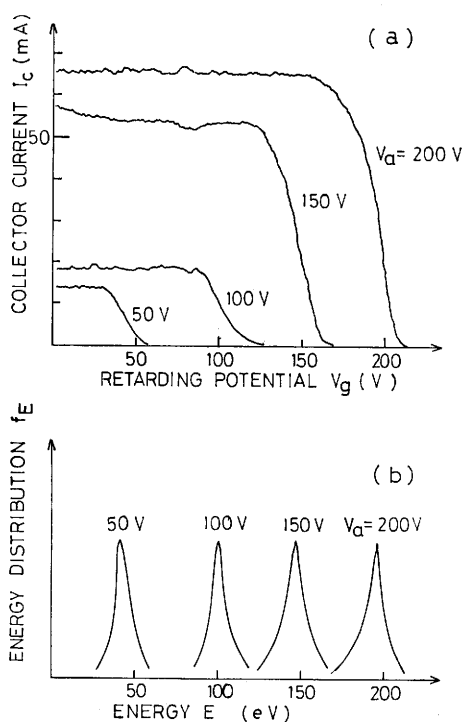


図3 ファラデーカップによるイオンビームの測定
(a) 加速電圧をパラメーターにしたコレクター電流とグリッド電圧の関係。
(b) イオンビームのエネルギー分布

は流れ込まないが、 V_g が200V前後で I_c は急激に増加し飽和する。この曲線を V_g で微分することによって、発生したイオンビームのエネルギー分布を知ることができる。それが図3(b)である。

3. 実験結果および考察

前節に述べた方法を用いて測定したイオンビームについての各種パラメーターに対する依存性を示す。図4は横軸には加速電圧 V_a 、縦軸にはイオンビームのエネルギー E_b (イオンビームのエネルギー分布が最大を示すエネルギー) をとったものである。加速電圧がそのままイオンビームのエネルギーになっていることがわかる。図5は横軸には加速電圧 V_a 、縦軸にはイオンビームの分布をマックスウェル分布であると仮定してイオンビームの温度 T_b をとっている。イオンビームの温度は数千度で、比較的エネルギーのそろっ

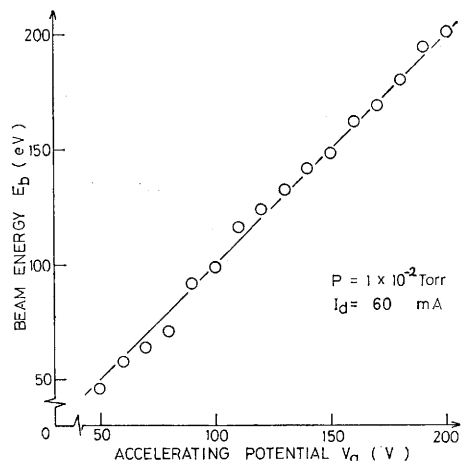


図4 加速電圧とイオンビームエネルギーの関係

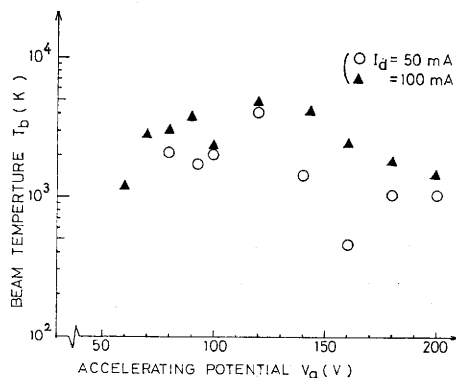


図5 加速電圧とイオンビームの温度の関係

たビームが得られていることがわかる。また、この温度はイオンビームを引き出すものとプラズマのイオン温度に等しいと考えられる。図6は、イオンビーム発生領域のアノードとカソードの直流放電電流 I_d を横軸にとり、イオンビームのエネルギー E_b を縦軸にとって、 I_d と E_b の関係を加速電圧 V_a をパラメーター

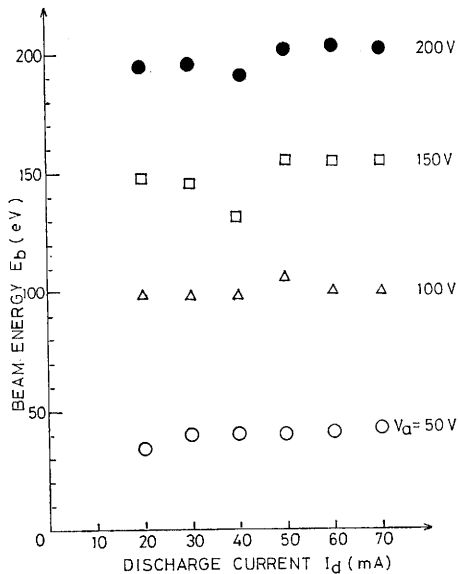


図6 放電電流の変化に対する、加速電圧とイオンビームエネルギーの関係

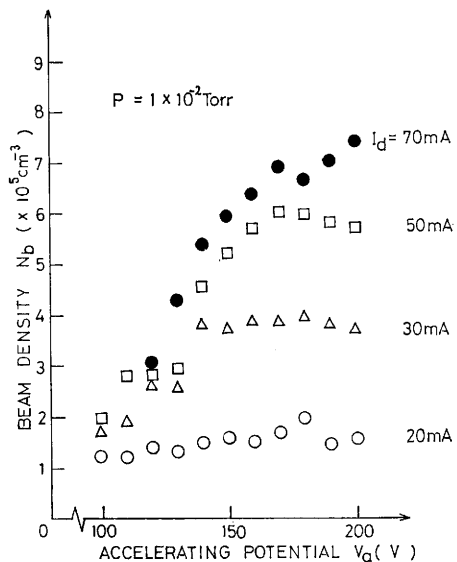


図7 放電電流の変化に対する、加速電圧とイオンビーム密度の関係。

として表わしたものである。放電電流 I_d の変圧に対して、イオンビームのエネルギーはほぼ一定で加速電圧に等しいことがわかる。図7は横軸に加速電圧 V_a 、縦軸にイオンビーム密度 N_b をとり、 N_b の V_a に対する変化の様子を放電電流 I_d をパラメーターにして表わしたものである。加速電圧 V_a が増すにつれて引き出されるイオンの数、すなわち、イオンビーム密度が増加し、ついには飽和している。また、放電電流 I_d が増加すれば、イオンビームを供給している放電領域のプラズマの密度も増加し、イオンビーム密度 N_b の飽和値が増す。このことより、放電電流 I_d を変化させることによって、イオンビーム密度 N_b を容易に変化させることができる。図8は横軸に放電電流 I_d 、縦軸にイオンビーム密度 N_b をとり、 N_b の I_d に対する変化の様子をイオンビーム源の放電領域の圧力 p をパラメーターにして表わしたものである。圧力 p が増すにつれて、イオンビーム密度 N_b が増す様子がわかる。これは、圧力 p の増加によって放電領域のプラズマ密度が増加するためである。

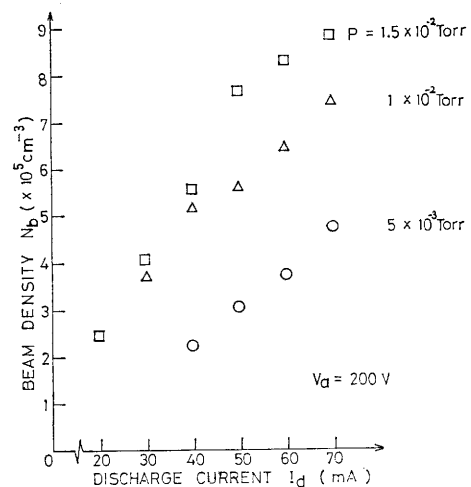


図8 圧力の変化に対する、放電電流とイオンビーム密度の関係。

4. 結 論

われわれの作製したイオンビーム源について、以下のことが結論される。

- (1) 発生したイオンビームは、加速電圧とほぼ等しいエネルギーを持ち、加速電圧を変化させることにより、0~200 eV のエネルギーを持ったイオンビームを作ることができる。
- (2) 発生したイオンビームは、エネルギーのよくそろ

ったものである。(T₀=0.03~1eV)

- (3) イオンビームの密度は，放電電流を変化することによって，1cm³ あたり 1×10^5 個 ~ 8×10^5 個の範囲で容易に変化させることができる。

謝 辞

この実験において，測定の援助をしていただいた川越浩君に感謝する。

参 考 文 献

- 1) 例えば， R. J. Briggs, Electron-stream interaction with plasmas (The M. I. T. Press, Cambridge, Massachusetts, 1964)

- 2) R. L. Stenzel and B. H. Ripin ; Rev. Sci. Instrum. 44 (1973) 617.
Hiroshi Ishizuka, Mitsuaki Ohyama
Keiichi Kamada, Hisao Ōno and Shoji Kojima; Jap. J. Appl. Phys. 14 (1975) 1217.
- 3) T. Honzawa and Y. Kawai; Phys. Letts. 33A (1970) 481.
Yoshinobu Kawai; J. Phys. Soc. Japan. 29 (1970) 1354.
T. Ohnuma, T. Fujita and S. Adachi ; Phys. Rev. Letts. 31 (1973) 1177.